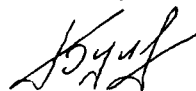


0-789561

На правах рукописи



БУЛАТОВ АЛЬБЕРТ РУНАРОВИЧ

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ БОРАТА ЖЕЛЕЗА И  
СЛАБОЛЕГИРОВАННЫХ ЛАНТАН-СТРОНЦИЕВЫХ  
МАНГАНИТОВ СОСТАВА  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $0.12 \leq x \leq 0.175$ )**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования  
«Казанский государственный энергетический университет» и  
учреждении Российской академии наук  
«Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского»  
Казанского научного центра РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Михалев Константин Николаевич

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Несмелова Ирина Михайловна

доктор физико-математических наук  
Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет», Институт физики

Защита состоится 28 октября 2011 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.082.01 при ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, тел./факс: (843) 562-43-30.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной государственной энергетической библиотеке

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687104

Р.И.Калимуллин

Автореферат разослан «1» сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.ф.-м.н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Последняя четверть XX века в физической науке характеризуется особым вниманием к открытиям необычных свойств оксидов металлов переходных групп. Вслед за высокотемпературными сверхпроводниками (оксидные соединения на основе меди) в последние два десятилетия проявляется большой интерес к другой группе оксидных материалов со структурой перовскита – к боратам железа и легированным манганитам типа  $R_{1-x}A_x MnO_3$  ( $R$  – редкоземельные ионы La, Pr, Nd;  $A$  – щелочноземельные ионы Sr, Ca, Ba и др.), относящимся к классу магнитных полупроводников [1, 2]. Вначале интерес к подобным веществам был связан с обнаружением в борате железа сильных магнитоупругого и электронно-ядерного взаимодействий, а затем в манганитах – неожиданных магнитотранспортных свойств. Было обнаружено, что при приложении магнитного поля электрическое сопротивление манганитов меняется на несколько порядков величины [3]. Величина этого влияния оказалась настолько большой по сравнению с магнитосопротивлением структур на основе 3d ферромагнитных металлов, что это явление было названо „колоссальным магнитосопротивлением” (КМС) [4]. Фазовая диаграмма манганитов содержит различные фазы с разными спинами, зарядами, решеткой и орбитальным порядком. При этом предполагалось, что даже в самых совершенных по структуре кристаллах манганитов имеются внутренние неоднородности, или, другими словами, в этих соединениях преобладает сосуществование кластеров конкурирующих фаз. Эти фазы обычно ферромагнитные или антиферромагнитные. Все большую поддержку получает предположение, что манганиты и бораты могут находиться в виде разделенных наноразмерных фазовых состояний, где две конкурирующие фазы достигают компромисса за счет образования наноразмерных структур. Термин „наноразмерный” характеризует длину этих частиц, хотя некоторые эксперименты подтверждают такое поведение и при их микрометрических размерах. Эти фазы могут иметь одинаковую или разную электронную плотность, но обычно их симметрия разная. Как манганиты, так и бораты железа обладают разнообразными доменными структурами.

Интерес к легированным манганитам и боратам железа в настоящее время прежде всего связан с перспективами их практического применения. Обе группы материалов могут быть использованы в качестве магнитоуправляемых акустических фильтров, генераторов, частотных преобразователей, а также как спиновые клапаны в спинтронике, магнитные головки для записи и считывания информации.

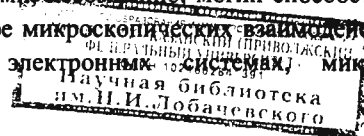
Значительная часть исследований к настоящему времени выполнена на лантан-стронциевых манганитах состава  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ , где  $0 \leq x \leq 0.9$ . Фазовая диаграмма этих соединений обладает большим разнообразием, а наибольшее

значение КМС наблюдается именно в образцах с концентрацией ионов Sr в пределах  $0.1 \leq x \leq 0.2$ . Следует отметить, что в данном диапазоне концентраций Sr и в температурном диапазоне 100–400 К лантан-стронциевые манганиты испытывают целую цепочку фазовых переходов с различными видами структурного, магнитного, орбитального и зарядового упорядочений, сопровождающихся резким изменением типа проводимости. В целом манганиты можно рассматривать как класс магнитных полупроводников, проводимость которых в зависимости от температуры и степени легирования изменяется от близкой к проводимости нелегированных полупроводников к проводимости сильнолегированных полупроводников. Из измерений электросопротивления оказалось, что система La-Sr-Mn-O является близкой к металлической при  $x \geq 0.2$ , в то время как при малой плотности легирования  $x \leq 0.2$  она становится изолятором. Это поведение является следствием необычных магнитотранспортных свойств манганитов и в настоящее время широко обсуждается в научной литературе.

В большинстве последних теорий, пытающихся объяснить КМС, делается заключение, что ключом для разгадки КМС является фазовое разделение в манганитах [5]. Изучение манганитов очень активно и быстро развивается [6], и даже доминирующая идея разделения фаз может быть оспорена в ближайшем будущем.

К исследованию физических свойств боратов и манганитов были привлечены и привлекаются различные физические методы: ЭПР, ЯМР, рентгеновская, мессбауэровская и нейтронно-дифракционная спектроскопия, магнитострикционные, термометрические методы и др.

Одним из перспективных методов для исследования манганитов и боратов является ультразвуковая спектроскопия. Ультразвуковые исследования уже позволили расширить существующие представления как о физических свойствах манганитов, так и о локальных упругих деформациях решетки и об их изменениях. Ультразвуковые волны неоднократно использовались для изучения особенностей структурных и магнитных фазовых переходов в манганитах [7, 8]. Однако применение сравнительно низких частот 0.1–10 МГц с длинами волн, превышающими намного мкм-диапазон, не позволяло изучать различные виды структурных и магнитных неоднородностей, а также особенности фазовых переходов. Кроме того, акустические исследования в большинстве случаев не сопровождались одновременным использованием других методов. Применение комплексных методов исследований с использованием значительно более высоких частот ультразвуковых колебаний  $f = (500-1200)$  МГц в сочетании с электрическими и магнитными измерениями, несомненно, могли способствовать получению новой информации о характере микроскопических взаимодействий в различных сильно коррелированных электронных системах микро- и



наноразмерных магнитных, структурных и зарядовых неоднородностях, а также о природе КМС в манганитах и возможностях его практического использования.

Вышеизложенное свидетельствует об **актуальности цели** данной диссертационной работы, состоящей в исследовании особенностей электронной и кристаллической структур, электронно-ядерных взаимодействий, локальных микроскопических неоднородностей и деформаций, формирующихся вблизи структурных и магнитных фазовых переходов, и их влияния на транспорт носителей в манганитах и борате железа методами акустической и магнитной спектроскопии.

Достижение этой цели предполагало **решение следующих задач.**

1. Разработка акустического спектрометра ЯМР (АЯМР) на 100 МГц и высокочастотных акустических спектрометров на частотный диапазон 500–1200 МГц.

2. Разработка комплексной методики исследований, включающей магнитные, магнитоакустические и магниторезистивные измерения в широком температурном диапазоне.

3. Комплексное изучение особенностей характеристик акустических волн, распространяющихся в лантан-стронциевых манганитах и боратах.

4. Изучение влияния доменной структуры на эволюцию сигналов ЯМР и дисперсию акустических волн вблизи частоты ЯМР в борате железа.

5. Путем анализа упругих, магнитных и транспортных характеристик установление взаимозависимости структурных и магнитных фаз с ян-теллеровскими искажениями решетки.

6. Исследование особенностей формирования структурных и магнитных неоднородностей вблизи фазовых переходов, их взаимозависимости с ян-теллеровскими искажениями решетки, влияния ян-теллеровских искажений на транспорт носителей заряда.

7. Проведение анализа изменений поперечных и продольных модулей упругости для установления связи с ян-теллеровскими искажениями, подавление которых при магнитном упорядочении может рассматриваться как возможная причина КМС в манганитах.

8. Исследование линейных и нелинейных акустических свойств манганитов, содержащих периодические доменные структуры, в том числе невзаимность распространения и модовое преобразование ультразвуковых волн.

#### **Научная новизна работы.**

Выполненные исследования показали высокую эффективность магнитоакустических методов при изучении различных динамических эффектов в оксидах с сильно коррелированными электронными системами и позволили получить ряд принципиально новых результатов, к которым можно отнести следующие.

1. С помощью высокочастотных акустических волн исследовано влияние ян-теллеровских деформаций решетки на структурные и магнитные фазы слаболегированных лантан-стронциевых манганитов.

2. Обнаружены и теоретически идентифицированы в образцах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ) высокотемпературные структурные фазовые переходы первого рода, связанные с перестройкой структуры ян-теллеровских искажений октаэдров  $\text{MnO}_6$ . Установлено влияние спонтанной намагниченности и приложенного магнитного поля на структурные фазовые переходы.

3. Для образцов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) экспериментально обнаружено и теоретически интерпретировано возникновение генерации когерентной магнитоупругой волны вблизи магнитного фазового перехода. Установлено, что она возникает на микронеоднородностях (магнитоупругих доменах).

4. С помощью анализа измеренных параметров модулей упругости поперечных и продольных акустических волн для образцов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ) выполнено разделение вкладов локальных и кооперативных ян-теллеровских искажений октаэдров в изменение кристаллической структуры манганитов.

5. Показано, что аномалии в параметрах модулей упругости для продольных волн в  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  отражают локальные ян-теллеровские искажения, подавление которых при магнитном упорядочении рассматривается как возможная причина колоссального магнитосопротивления, предложена модель конкурирующих ян-теллеровских искажений и магнитного упорядочения.

6. Установлено, что ядерная спин-система в  $\text{FeBO}_3$  оказывает существенное влияние на магнитоупругие свойства магнетиков в области частот, близких к частоте ЯМР.

7. Обнаружены значительное изменение ( $\approx 20\%$ ) скорости акустических волн вблизи частоты ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  в борате железа и перемена знака дисперсии при прохождении точки резонанса.

8. Обнаружены и интерпретированы различия в скорости акустических волн, распространяющихся в противоположных направлениях, в образцах манганитов состава  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  (эффект акустической невзаимности).

**Научная и практическая значимость работы** заключается в следующем.

1. Разработанные и изготовленные импульсные акустические спектрометры на рабочие частоты  $f = (500-1200)$  МГц с параметрами в импульсе  $P_{\text{вых}} \approx (1-5)$  кВт, чувствительностью приемного тракта не хуже  $\sim 10^{-14}$  Вт, длительностью импульсов  $\tau_{\text{и}} \approx (0.1-2)$  мкс, развязкой передающего и приемного трактов не менее 100 дБ являются уникальными, не имеющими аналогов в России приборами, что позволяет изучать локальные изменения кристаллической структуры на длине волны  $\lambda \leq 10$  мкм в зависимости от магнитного поля, температуры и мощности акустического импульса.

2. Полученные результаты и их анализ вносят существенный вклад в формирование современных представлений о физике материалов с колоссальным и гигантским магнитосопротивлением.

3. На основе полученных экспериментальных данных сделан вывод, что подавление локальных ян-теллеровских искажений при магнитном упорядочении может рассматриваться как возможная причина КМС.

4. Разработанная экспериментальная методика изучения доменной структуры  $\text{FeVO}_3$ , основанная на применении сильных радиочастотных полей, может быть использована для изучения доменной структуры разнообразных магнитоупорядоченных веществ.

5. Полученные в работе результаты могут найти применение при создании нового поколения перестраиваемых акустических фильтров, устройств модового и частотного преобразования ультразвуковых волн в широком частотном диапазоне.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Обнаруженные температурный и магнитный гистерезисы при резких изменениях модулей упругости для поперечных акустических волн в сочетании с данными по электропроводности и намагниченности на образцах манганитов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15$  и  $0.175$ ) позволили установить два структурных фазовых перехода первого рода, в результате которых кристаллическая структура переходит из ромбоэдрической фазы в орторомбическую в условиях ян-теллеровских искажений октаэдров  $\text{MnO}_6$ .

2. Обнаруженные микронеоднородности вблизи магнитного фазового перехода интерпретируются как магнитоупругие домены, возникающие за счет двухфазного структурного состояния манганита состава  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  в широком температурном диапазоне.

3. Возникновение генерации магнитоупругой волны на микронеоднородностях (магнитоупругих доменах) объясняется формированием когерентной моды за счет высокой акустической добротности образца  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  при многократном отражении колебаний от плоскопараллельных торцов образца.

4. Анализ измеренных параметров модулей упругости поперечных и продольных акустических волн, распространяющихся в лантан-стронциевых манганитах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  различной степени легирования ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ), позволяет разделить вклады локальных и кооперативных ян-теллеровских искажений в изменение кристаллической структуры манганитов.

5. Аномалии в параметрах модулей упругости для продольного гиперзвука в манганитах лантана  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  связаны с локальными ян-теллеровскими искажениями, подавление которых магнитным упорядочением может рассматриваться как возможная причина КМС.

6. Обнаруженное различие в скоростях продольных акустических волн, распространяющихся в противоположных направлениях, трактуется как эффект акустической невзаимности, причиной которой является существование в определенном температурном интервале структурных и магнитных многофазных состояний и образование структурных микроскопических неоднородностей.

7. Полученные в работе результаты в легированных манганитах вносят вклад в выяснение причины колоссального магнитосопротивления, которое имеет большие перспективы для практического применения.

**Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов** обеспечены достоверностью, непротиворечивостью и достаточностью исходных положений, комплексным характером выполненных экспериментальных исследований, их многократной повторяемостью, непротиворечивостью результатов, полученных различными методами, а также использованием высокочувствительной экспериментальной аппаратуры. Полученные результаты соответствуют экспериментальным результатам и теоретическим моделям, опубликованным в научных статьях, обзорах и монографиях.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на различных международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, в числе которых: Международные научные конференции „Актуальные проблемы физики твердого тела” (Минск, 2003, 2005, 2007 и 2009 гг.); The Moscow International Symposium on magnetism (Москва, 2002, 2005 г.); VII Российская научная школа „Новые аспекты применения магнитного резонанса” (Казань, 2003 г.); XXXIII совещание по физике низких температур (Екатеренбург, 2003 г.); The international conference „Nanoscale Properties of Condensed Matter NanoRes – 2004” (Казань, 2004 г.); XIX международная школа „Новые магнитные материалы микроэлектроники” (Москва, 2004 г.); Международная конференция „Физика диэлектриков” (Санкт-Петербург, 2004 г.); XI Международная научно-техническая конференция МЭИ (Москва, 2005 г.); Международная конференция „Fundamental problems of physics” (Казань, 2005 г.); 34 совещания по физике низких температур „НТ–34” (Ростов-на-Дону, 2006 г.); Международные симпозиумы „Упорядочение в металлах и сплавах” (Ростов-на-Дону, 2006, 2007, 2008 и 2009 гг.); Международные школы физиков-теоретиков „Коуровка” (2004, 2006, 2008 и 2010 гг.); 3rd International Conference „Physics of Electronic Materials” (Калуга, 2008 г.); The International conference „Modern development of magnetic resonance” (Казань, 2007 г.); Euro-Asian Symposium Magnetism on a Nanoscale (EASTMAG) (Казань, 2007 г.; Екатеринбург, 2001 и 2010 гг.); International conference on Nanomaterials and nanotechnology (Тами Нату, Индия, 2010 г.); итоговые научные конференции КФТИ КазНЦ РАН им. Е.К. Завойского (Казань, 2003–2009 гг.).



Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, были включены в отчеты по грантам РФФИ (01-02-16358-а, 02-02-16440-а, 04-02-97500, 05-02-16087-а, 08-02-00904-а).

**Реализация результатов.** Результаты работы использованы при разработке учебных курсов «Магнитные элементы электронных устройств», «Современные проблемы электроники», «Материалы и элементы электронной техники» в Казанском государственном энергетическом университете.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 29 печатных работах, в том числе 16 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 13 – в сборниках докладов международных и всероссийских конференций.

**Личный вклад автора в проведенное исследование.** Диссертация является обобщением исследований автора, заключающихся в выборе темы исследования, постановке целей и задач диссертационной работы, разработке экспериментального комплекса, в том числе ВЧ акустических спектрометров и методик исследований, обеспечивающих решение поставленных задач, проведении структурных, магнитных и магнитотранспортных измерений, анализе полученных результатов, обобщении работы. Основная часть экспериментальных результатов получена автором лично. Соавторы не возражают против использования результатов исследования в материалах диссертации.

Монокристаллические образцы, использованные в исследованиях, были выращены в группе Балашова А.М. (МЭИ). Высокочастотные акустические спектрометры со всеми приставками были изготовлены при участии Леонтьева В.Е., Капралова А.В., Потапова А.А. Обсуждение результатов проводилось совместно с Голенищевым-Кутузовым В.А., Куркиным М.И. Ряд магнитных измерений был выполнен в ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург).

#### **Соответствие диссертации научной специальности.**

Диссертация соответствует специальности 01.04.10 – Физика полупроводников. Представленные в ней результаты соответствуют п. 11 «Динамика кристаллической решетки. Электрон-фононное взаимодействие»; п. 16 «Магнитные полупроводники»; п. 19 «Разработка методов исследований полупроводников и композитных полупроводниковых структур» Паспорта специальности.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы и авторского списка – перечня основных публикаций автора по теме диссертации. Объем работы составляет 245 страниц, включая 74 иллюстрации, 3 таблицы и список литературы из 170 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы и выбор объектов исследования, сформулированы цели и задачи, а также основные положения, составляющие научную новизну и практическую значимость диссертации, сведения об апробации, личный вклад автора.

Первая глава посвящена технике и методике экспериментов, необходимость включения которых продиктована тем, что автором были разработаны уникальные импульсные акустические спектрометры на частоты  $f = (10-100)$  МГц и  $f = (500-1200)$  МГц, передающий и приемные тракты которых имеют большую выходную мощность и высокую чувствительность, необходимые для генерации мощных акустических импульсов и регистрации изменения акустических параметров (скорости, затухания) с точностью до 0.5%, а также оригинальный узел – акустическое устройство нерезонансного типа для возбуждения ультразвуковых волн в широком диапазоне частот, что невозможно осуществить с помощью акустического устройства резонансного типа (объемные акустические резонаторы).

Действующие спектрометры и результаты, полученные на них автором, являются решением сложной технической задачи, поскольку аналогов такого спектрометра, насколько это нам известно, нет в мире.

Кроме того, в первой главе описаны традиционные методы исследования структуры, элементного состава, электросопротивления и магнитных свойств манганитов. Также здесь рассмотрены базовые понятия электроакустики, характеристики ультразвуковых волн, ультразвуковые преобразователи, методы измерения параметров ультразвуковых волн.

Во второй главе изложены экспериментальные результаты по исследованию доменной структуры, дисперсии скорости звука при магнитоакустическом резонансе и их интерпретация в борате железа ( $\text{FeBO}_3$ ), относящегося, так же как и манганиты, к оксидам 3d металлов.

В начале главы излагается описание электронной структуры бората железа. Показано, что наиболее адекватной моделью электронной структуры 3d металлов со структурой  $\text{ABO}_3$  ( $A = \text{Fe, Cr, V, Te}$ ), с единой точки зрения описывающей электронные и магнитные свойства, является многозонная модель Хаббарда [9].

На основе электронной структуры дается качественное объяснение всей совокупности данных по электропроводности и намагнитченности бората железа.

Далее во второй главе излагаются результаты экспериментального исследования проявления доменной структуры образцов бората железа в сигналах ЯМР в слабых магнитных полях. Описаны упругие и магнитные свойства, а также дано подробное описание кристаллической и магнитной структуры исследованного соединения  $\text{FeBO}_3$ . В этой главе приводятся данные экспериментов, полученные автором в результате наблюдения за эволюцией сигналов ЯМР при монодоменизации образцов  $\text{FeBO}_3$ .

Рассмотрены три экспериментальные ситуации, которые соответствуют трем различным геометриям взаимного расположения постоянного  $\mathbf{H}$  и переменного  $\mathbf{H}_1$  магнитных полей относительно „легкой“ базисной плоскости кристалла.

В первом случае были исследованы особенности ЯМР в перпендикулярных полях  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{H}_1$ , приложенных в „легкой“ плоскости. В этой геометрии имело место расщепление сигнала ЯМР на три хорошо разрешенных пика поглощения: „основной“ на частоте ЯМР и два „боковых“ на частотах, близких к частоте ЯМР. Динамика сигналов ЯМР в зависимости от постоянного поля носила следующий характер. С ростом поля  $H$  исчезали только „боковые“ пики, которые быстро уменьшались по амплитуде, тогда как амплитуда „основного“ росла (рис. 1).

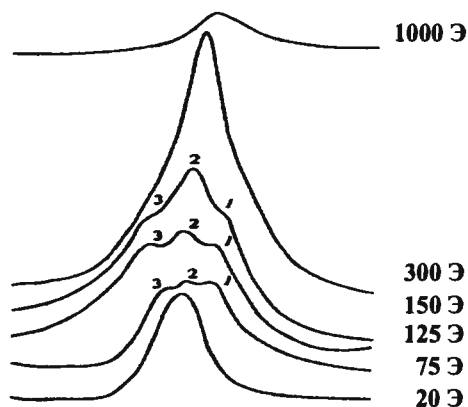


Рис. 1. Расщепление спектра ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  при  $\Delta P = -15$  дБ ( $\mathbf{H}_1 \perp \mathbf{H}$ )  $\parallel (111)$ . 2 – основной сигнал на частоте ЯМР, 1,3 – сигналы, полученные в результате расщепления 2 на частоты, близкие к частоте ЯМР.

Во втором случае, когда поля  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{H}_1$  были приложены в „легкой“ плоскости параллельно друг другу, удалось обнаружить нехарактерное для монокристаллических образцов  $\text{FeVO}_3$  расщепление сигнала ЯМР на два хорошо разрешенных пика поглощения, близких к частоте ЯМР. С ростом поля наблюдалось увеличение расщепления с одновременным спадом амплитуды обоих пиков, которые исчезали в полях  $H > 150$  Э.

Особенностью наблюдаемого поведения сигналов ЯМР явилось то, что эффект расщепления имел пороговый по мощности радиочастотного импульса характер.

В третьем случае постоянное поле было направлено вдоль „трудной“ оси кристалла, тогда как переменное поле было приложено в „легкой“ плоскости. В такой геометрии сигнал ЯМР наблюдался в виде узкой нерасщепленной одиночной линии на частоте ЯМР во всем интервале исследуемых полей ( $H < 1000$  Э), не проявляя при этом какой-либо зависимости от мощности переменного поля.

Согласно предложенной нами теоретической интерпретации наблюдаемые эффекты расщепления объясняются существованием сложной доменной структуры  $\text{FeBO}_3$ , которая представляет собой распределенные по толщине слоидомены, параллельные „легкой“ плоскости и различным направлениям намагниченности, каждый из которых, в свою очередь, имеет собственную доменную структуру. В многодоменных образцах в очень слабых полях основной вклад в сигнал ЯМР дают ядра, расположенные в доменных границах. С ростом поля  $H$  и исчезновением границ типа Нееля внутри слоев-доменов основной вклад в сигнал ЯМР дадут ядра, расположенные в слоях-доменах.

Это и объясняет расщепление сигналов ЯМР на несколько пиков в зависимости от расположения полей в „легкой“ плоскости (1 и 2 случаи). Отсутствие расщепления в третьем случае можно объяснить тем, что поле, приложенное вдоль „трудной“ оси, одинаково подмагничивает как домены, так и доменные границы, не оказывая существенного влияния на доменную структуру в полях, меньших по значению поля магнитной анизотропии в направлении „трудной“ оси. Пороговый по мощности переменного поля характер эффектов определяется тем, что коэффициент усиления, быстро убывающий с ростом постоянного поля, может быть скомпенсирован увеличением амплитуды поля  $H_1$ , создавая оптимальные условия для наблюдения сигнала ЯМР.

Далее во второй главе приведены результаты экспериментального изучения зависимости скорости ультразвука в условиях ядерного магнитоакустического резонанса от постоянного магнитного поля в  $\text{FeBO}_3$ . На рис. 2 приведена экспериментальная частотная зависимость относительного изменения фазовой скорости продольного ультразвука в области частот ЯМР. На частотах близких, но меньших частоты ЯМР, наблюдалось существенное по величине уменьшение скорости ультразвукового (УЗ) импульса. При прохождении точки резонанса был обнаружен ранее не наблюдавшийся скачок скорости, сопровождавшийся изменением знака дисперсии. Максимальное изменение скорости при прохождении резонанса составило  $\sim 20\%$ .

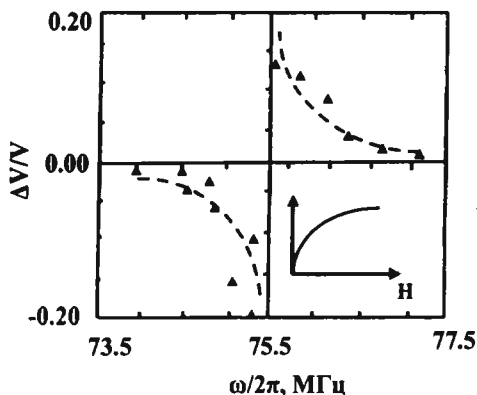


Рис. 2. Частотная и полевая (на вставке) зависимости относительной фазовой скорости поперечной ультразвуковой волны.

Показано, что наблюдаемый эффект связан с сильной магнитоупругой связью, характерной для легкоплоскостных антиферромагнетиков, и с ее зависимостью от состояния магнитной подсистемы  $\text{FeVO}_3$ . При этом влияние ядерных спинов на состояние магнитной подсистемы обнаруживалось только при воздействии на них ультразвуковыми полями, частота которых близка к частоте ЯМР, так что изменения в магнитной подсистеме носили резонансный характер, отражаясь на перенормировке модулей упругости и скорости ультразвуковых волн соответственно.

Для теоретического описания влияния ядерной спин-системы магнетика на характеристики упругих колебаний решалась совместная система уравнений движения ядерных намагниченностей и уравнений упругой волны:

$$\frac{d\mathbf{m}_i}{dt} = \gamma_n [\mathbf{m}_i \times \mathbf{H}_{ni}] , \quad \rho \frac{\partial^2 u_k}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ki}}{\partial X_i} , \quad k, l = X, Y, Z, \quad (1)$$

где  $\gamma_n$  – ядерное гиромагнитное отношение;  $\mathbf{H}_{ni}$  – эффективные магнитные поля, определяемые взаимодействиями, в которых участвуют ядерные спины;  $u_k$  – компонента вектора смещений;  $\sigma_{ki}$  – компонента тензора упругих напряжений, вычисляемого с учетом магнитоупругой связи  $W_{ME}$ .

Из решения данной системы уравнений было получено дисперсионное уравнение, определяющее влияние ядерной спин-системы на связь частоты ( $\omega$ ) и волнового вектора  $\mathbf{k}$  связанных магнитоупругих волн:

$$(\omega_{nf}^2 - \omega^2) (V_s^2(H) k^2 - \omega^2) - k^2 V_s^2(\infty) \omega_{0n}^2 \left( \frac{\gamma}{\omega_f} \right)^2 H_E H_e B = 0, \\ H_e = A m_0, \quad (2)$$

$$V_s^2(H) = V_s^2(\infty) (1 - B), \\ B = \frac{4 H_E B_{14}^2 \cos^2 2\varphi_0}{M_0 C_{44} [H(H + H_D) + 2 H_E H_{ms}^0]}, \quad (3)$$

где  $V_s(H)$  – скорость звука при определенном значении  $H$ ;  $V_s^2(\infty) = V_s^2(H = \infty)$ ;  $\varphi_0$  – равновесное значение азимутального угла вектора антиферромагнетизма  $\mathbf{L}$ ;  $\mathbf{M}_0$  – равновесное значение вектора суммарной намагниченности подрешеток;  $\mathbf{m}_0$  – равновесное значение ядерной намагниченности;  $A$  – константа сверхтонкого взаимодействия.

Третья глава посвящена литературному обзору исследуемых нами магнитных полупроводников – манганитов. В начале главы рассматриваются основные физические свойства манганитов:

- модели кристаллических структурных фаз легированных манганитов лантана. Приводятся обстоятельный кристаллохимический анализ структур кубических перовскитных соединений, к которым относятся и манганиты с различными численными значениями ионных радиусов, и модели кристаллических структур: ромбоэдрическая и орторомбическая. Это делается, чтобы использовать модели кристаллических структур легированных манганитов лантана для выявления в дальнейшем в ходе экспериментальных исследований причин, приводящих к их искажению;

- подробно рассмотрены основные типы магнитного упорядочения и другие магнитные свойства лантан-стронциевых манганитов, рассмотрено влияние эффекта Яна – Теллера на структурные фазовые переходы в манганитах, квадрупольно-деформационное взаимодействие ян-теллеровских систем с ультразвуковыми волнами.

В четвертой главе представлены результаты исследований структурных, магнитных и транспортных свойств лантан-стронциевых манганитов.

Основное содержание главы составляет изучение особенностей распространения продольных и поперечных акустических волн через образцы лантан-стронциевых манганитов состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125, 0.15$  и  $0.175$ . Для этих образцов автором получены экспериментальные результаты по изменению сдвиговых  $(C_{11} - C_{12})/2$ ,  $C_{44}$  и продольных  $C_{11}$  модулей упругости акустических волн в зависимости от температуры и приложенного магнитного поля.

Показано, что для образца  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125$ ) значительные изменения модулей упругости  $(C_{11} - C_{12})/2$ ,  $C_{44}$  и  $C_{11}$  в интервале температур  $T = (270-290)$  К

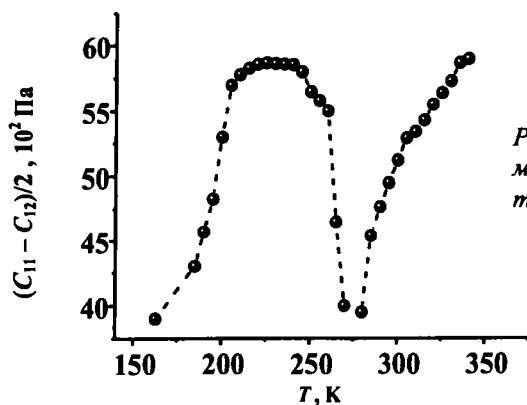


Рис. 3. Зависимость сдвиговых модулей упругости  $(C_{11} - C_{12})/2$  от температуры для  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ .

и  $T = (150-180)$  К (рис. 3, 4) отражают структурные фазовые переходы и подтверждают существование высокотемпературного структурного перехода при  $T \approx 285$  К, о котором сообщалось в работах [10].

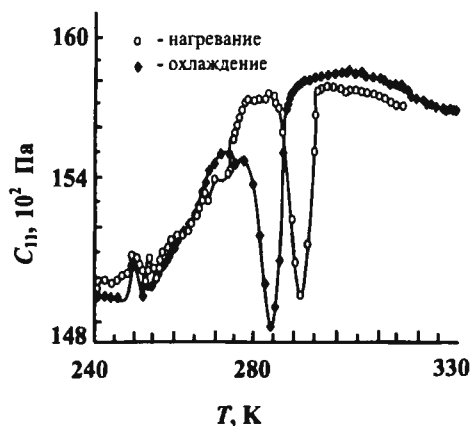


Рис. 4. Зависимость продольного модуля  $C_{11}$  от температуры для  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ .

Температурный гистерезис значений  $C_{11}$  и максимумов затухания акустических волн позволил отнести данный структурный переход к фазовому переходу первого рода. Этим температурным интервалам изменения модулей упругости  $C_{11}$  и  $(C_{11} - C_{12})/2$  соответствовали изменения удельного электросопротивления  $\rho$  и восприимчивости  $\chi_{\text{ac}}$  (рис. 5 и 6).

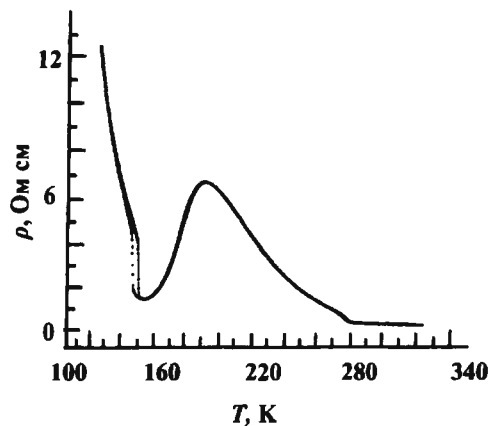


Рис. 5. Зависимость удельного электрического сопротивления  $\rho$  от температуры для образца  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ .

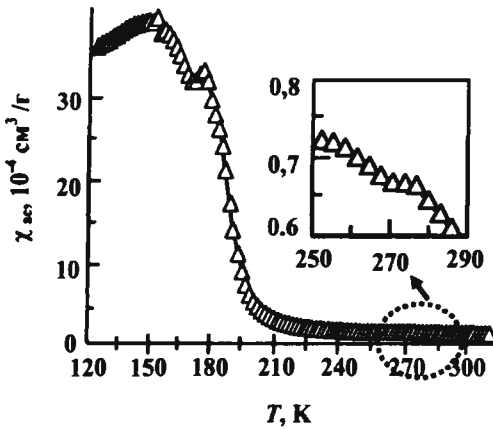


Рис. 6. Зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  от температуры для образца  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$  (на вставке приведен участок (250–300) К в увеличенном масштабе).

Далее в этой главе приведены результаты по исследованию высокотемпературных структурных фазовых переходов, полученные автором в образцах с  $x = 0.15$  вблизи  $T = 300$  К (рис. 7) и  $x = 0.175$  вблизи  $T = 310$  К (рис. 8).

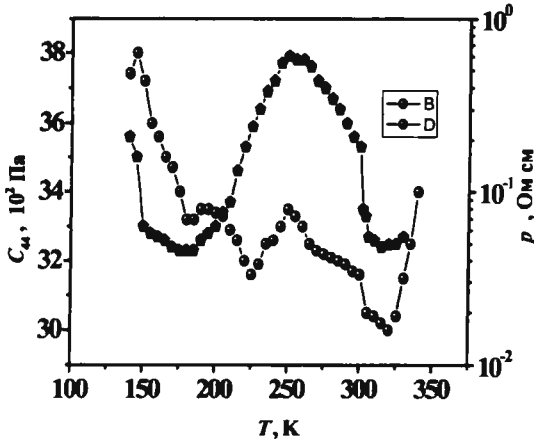


Рис. 7. Зависимость  $C_{44}$  (B) и удельного электросопротивления  $\rho$  (D) от температуры для образца  $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ .

Для образца с  $x = 0.15$  вблизи  $T_{s1} = 320$  К обнаружено резкое уменьшение модуля упругости  $C_{44}$ , а также электросопротивления, которое было отнесено автором, не наблюдавшемуся ранее, к структурному фазовому переходу (рис. 7). Изменение намагниченности  $M$  для данного образца совпадает с полученными данными.



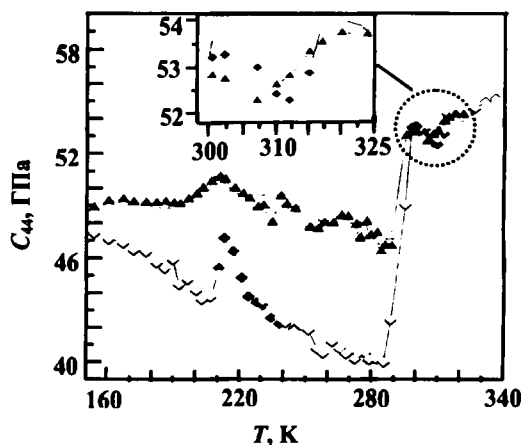


Рис. 8. Температурная зависимость модуля упругости  $C_{44}$  в манганите  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  (на вставке приведен участок 295–325 К в увеличенном масштабе):

- ◆  $H = 0$  охлаждение,
- ▲  $H = 10$  кЭ охлаждение,
- ◆  $H = 0$  нагрев,
- ▲  $H = 10$  кЭ нагрев.

Измеренное автором для образца с  $x = 0.175$  изменение параметров  $C_{44}$  в окрестности  $T = 285\text{ K}$  имело безгистерезисный характер и соответствовало переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние, что подтверждается резистивными (рис. 9) и магнитными измерениями, выполненными на том же образце.

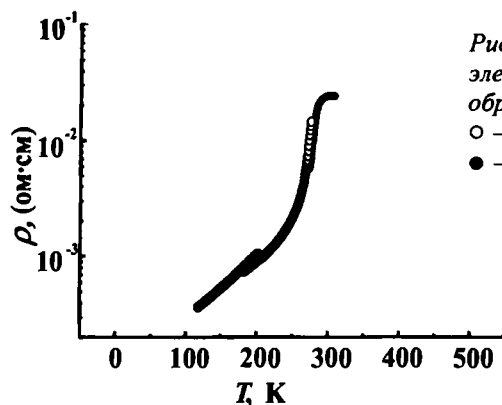


Рис. 9. Температурная зависимость электросопротивления исследуемого образца  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ :

- – нагревание
- – охлаждение

Изменения величин  $C_{44}$  и  $C_{11}$  для образца с  $x = 0.175$  вблизи  $T = 300\text{--}310\text{ K}$  и  $200\text{--}210\text{ K}$  имели гистерезисный характер, что позволило отнести их к структурным фазовым переходам из ромбоэдрического в орторомбическое состояние в парамагнитной (впервые обнаруженные автором) и ферромагнитных фазах.

Сравнение экспериментальных кривых для модулей упругости, электросопротивления и восприимчивости для исследованных образцов лантан-стронциевых манганитов показывает преимущество акустических измерений при изучении структурных фазовых переходов.

При исследовании магнитных характеристик в образце  $\text{La}_{0,825}\text{Sr}_{0,175}\text{MnO}_3$  обнаружены аномальные участки убывания восприимчивости в ферромагнитной области, отличающиеся от закона Кюри – Вейса (рис. 10). Как известно, таких участков для  $\chi(T)$  не должно быть. Для объяснения этого факта нами был введен третий тип восприимчивости  $\chi_\theta$ , соответствующий ориентации  $\mathbf{H}$  под произвольным углом  $\theta$  к оси легкого намагничивания  $z$ . Получено выражение для  $\chi_\theta(H)$  в виде:

$$\chi_\theta(H) = \frac{\partial(M \cos(\theta - \vartheta))}{\partial H} = \left( \frac{\partial M}{\partial H} \right) \cos(\theta - \vartheta) + M \sin(\theta - \vartheta) \frac{\partial \vartheta}{\partial H}, \quad (5)$$

где  $\theta$  – угол между  $z$  и  $\mathbf{H}$ ,  $\vartheta$  – угол между  $z$  и  $\mathbf{M}$ .

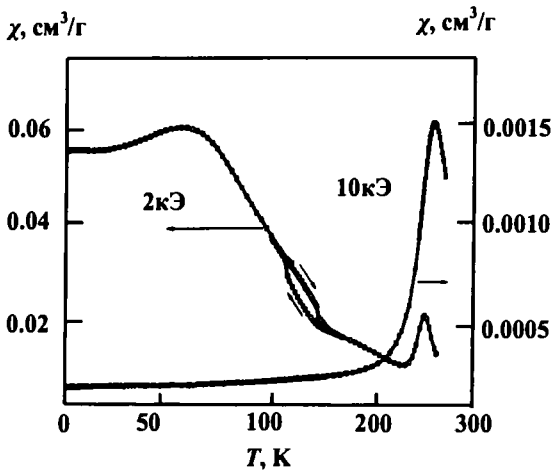


Рис. 10. Температурная зависимость магнитной восприимчивости  $\chi(T)$  для образца  $\text{La}_{0,825}\text{Sr}_{0,175}\text{MnO}_3$  в магнитном поле  $H = 2$  кЭ и  $H = 10$  кЭ.

Восприимчивость  $\chi_\theta$  описывает процесс вращения  $\mathbf{M}$  в отдельном домене, у которого ось легкого намагничивания  $z$  ориентирована под углом  $\theta$  к полю  $\mathbf{H}$ . Хорошее совпадение наших экспериментальных точек с падающего участка  $\chi(T)$  (рис. 10) и теоретической кривой дали возможность предположить, что падающий участок  $\chi(T)$  связан с намагничиванием ферромагнетика за счет процессов вращения магнитных моментов доменов [11].

В пятой главе диссертации приведены экспериментальные результаты и их теоретическая интерпретация по изучению влияния эффекта Яна – Теллера на физические свойства манганитов. Хорошо известно [2], что ЯТ эффект связан с искажением локальной симметрии окружения ЯТ иона. При кооперативных ЯТ деформациях эти локальные искажения при сложении изменяют симметрию кристалла в целом. Такого типа деформации влияют на распространение поперечного звука, поэтому кооперативный ЯТ эффект можно описывать с помощью взаимодействия вида:

$$H_{Q\epsilon} = - \sum_i g_i Q_i \epsilon_i, \quad (6)$$

где  $\epsilon_i$  ( $i = 1, 2$ ) – упругие деформации, соответствующие следующим двум нормальным модам поперечных упругих волн:

$$\epsilon_1 = (2\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})/\sqrt{3}, \quad \epsilon_2 = (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}), \quad (7)$$

$Q_i$  – квадрупольные моменты электронных оболочек в состояниях с симметрией  $d_{z^2}$  ( $i=1$ ) и  $d_{x^2-y^2}$  ( $i=2$ ),  $g_{1,2}$  – соответствующие константы связи.

Основанием для наших исследований послужило то, что до сих пор экспериментально обнаруженные многими авторами величины КМС не до конца объясняются широко признанным «механизмом двойного обмена» в манганитах. В последние годы интенсивно обсуждаются другие модели, объясняющие КМС. Например, модель конкурирующих ян-теллеровских искажений и магнитного упорядочения [10].

Для оценки влияния ЯТ эффекта на структурные и магнитные фазовые переходы и КМС в лантан-стронциевых манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125, 0.15$  и  $0.175$  на основании данных (рис. 3, 4, 7, 8, 9) автором составлен график, на котором приведены характеристики температурных изменений параметров акустических волн вблизи фазовых переходов: относительное изменение модулей упругости для различных видов акустических волн, а также температурные изменения электросопротивления (рис. 11). В ряде случаев эти данные сопоставимы с результатами, полученными другими авторами [12]. Как показывают данные, приведенные на рис. 11, относительные изменения  $C_{11}$  для образца с  $x = 0.125$  составляют 3–6% и возрастают до 20–30% для образца с  $x = 0.175$ . Относительные изменения модуля  $(C_{11} - C_{12})/2$  составляют 50–60% для образца с  $x = 0.125$  и уменьшается до 4% для образца с  $x = 0.15$ . Изменения модуля  $C_{44}$  варьируются от 8% ( $x = 0.125$ ) до 3–4% ( $x = 0.175$ ). Температурные

зависимости изменения модулей  $(C_{11} - C_{12})/2$  для поперечных волн ниже структурного перехода  $O^* \rightarrow O'$  хорошо совпадают с температурными изменениями коэффициента отражения рентгеновских лучей, стрикции и структурного параметра  $\xi = a/(c/\sqrt{2})$  в монокристаллах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125$ ) [10] (рис. 12), что позволяет идентифицировать этот процесс как возникновение кооперативного ЯТ упорядочения деформированных октаэдров  $\text{MnO}_6$ .

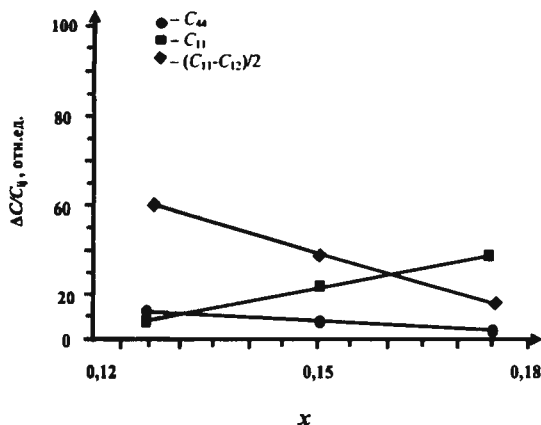


Рис. 11. Зависимость относительного изменения модулей упругости и электросопротивления в манганитах  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  от концентрации ионов Sr.

Малые изменения параметров продольных волн выше  $T_c$  могут свидетельствовать о сравнительно небольшом изменении локального упорядочения среди октаэдров  $\text{MnO}_6$ .

Особенности дополнительного поглощения акустических волн в приложенном магнитном поле (рис. 8) можно связать с конкурентным взаимодействием магнитного упорядочения с ЯТ упорядочением.

Поскольку спонтанная намагниченность при  $T = 290$  К равна  $10^{-2} \mu_B/\text{Mn}$ , а в поле  $B = 1$  Тл возрастает до  $8 \cdot 10^{-2} \mu_B/\text{Mn}$ , изменение параметров акустической волны ниже  $T = 290$  К происходит в условиях как увеличения кооперативных ЯТ искажений, так и магнитного упорядочения. При этом несколько уменьшается намагниченность, а процесс образования кооперативных ЯТ искажений в условиях частичного его подавления магнитным полем сдвигается в сторону более низкой температуры.

Подобный эффект влияния магнитного поля на температурный сдвиг перехода от локального ЯТ искажения к кооперативному ЯТ искажению уже наблюдался в подобном образце с  $x = 0.125$  по сдвигу пика теплоемкости вниз по температуре в приложенном магнитном поле. Поскольку намагниченность образца в поле  $B = 1$  Тл в диапазоне температур  $T = (200 - 290)$  К недостаточна

для подавления кооперативного ЯТ искажения, которое полностью завершается только при  $T = 160$  К, то дополнительное возрастание затухания при  $B = 1$  Тл определяется усилением спин-фононного взаимодействия при росте спинового упорядочения.

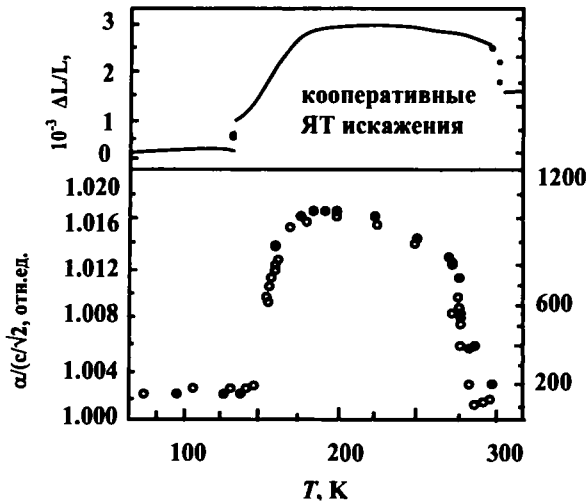


Рис. 12. Сравнение между температурной зависимостью макроскопической длины образца  $\Delta L/L$  (наверху) со структурным параметром  $\xi = a/(c/\sqrt{2})$

○ -  $I_{300}$ ,  
● -  $a/(c/\sqrt{2})$ .

Для образцов  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $0.15 < x < 0.175$  наиболее велики изменения значений упругих модулей  $C_{11}$  вблизи фазового перехода  $T_s = 200$  К, причем изменения возрастают с увеличением концентрации ионов Sr (рис. 11). Наоборот, изменение упругих модулей  $(C_{11} - C_{12})/2$  и  $C_{44}$  относительно малы и убывают с ростом концентрации стронция. Для всех образцов с  $x = 0.165, 0.170, 0.175$  обнаруженные структурные фазовые переходы находятся в температурных интервалах выше магнитных переходов на 15–20 К. Приведенные факты позволяют отнести эти переходы к типу «порядок-беспорядок», вызванных подавлением локальных структур искаженных октаэдров магнитным упорядочением.

Дополнительное доказательство этому выводу можно найти в характере влияния приложенного магнитного поля на температуру магнитного ( $T_c$ ) и структурного ( $T_s$ ) переходов в образце с  $x = 0.175$ . В поле  $B = 1$  Тл  $T_c$  сдвигается в сторону больших температур, поскольку к спонтанной намагниченности прибавляется внешнее поле. Наоборот, значение  $T_s = (200\text{--}210)$  К (рис. 8) в магнитном поле сдвигается в сторону более низких температур. Последний эффект можно объяснить конкуренцией между намагниченностью и ЯТ искажением [2].

На основании полученных нами данных и сопоставления их с данными других авторов можно представить уточненную по сравнению с диаграммой в работах [13, 14, 15] фазовую диаграмму для слабелегированных лантан-стронциевых манганитов (рис. 13), на которой высокотемпературные фазовые переходы из ромбоэдрической в орторомбическую фазу соответствуют возникновению искаженных октаэдров кислорода вблизи ЯТ ионов  $Mn^{3+}$ .

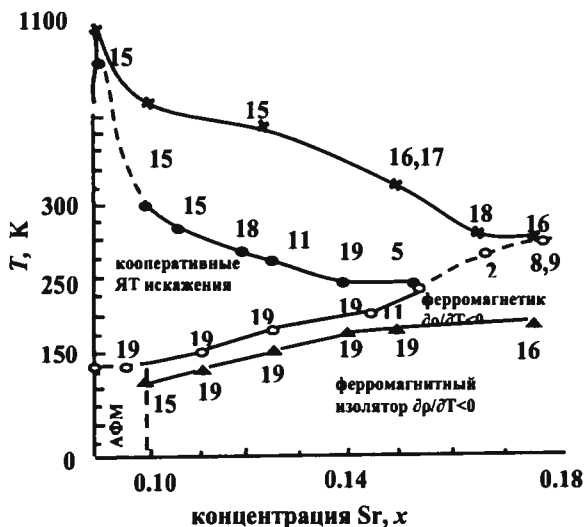


Рис. 13. Зависимость фазовых областей и температур фазовых переходов от концентрации ионов Sr:

X –  $T_{RO}$ .

● –  $T_{JT}$ .

○ –  $T_C$ .

▲ –  $T_{CO}$ .

Цифрами обозначены источники информации.

При дальнейшем понижении температуры до  $T_{JT}$  возникает упорядочение среди искаженных октаэдров  $MnO_6$ , представляющее переход в кооперативную фазу. Эта фаза уменьшается с ростом концентрации ионов Sr и исчезает при  $x \geq 0.15$ .

В конце главы сделан вывод о том, что полученные нами результаты связаны с локальными ян-теллеровскими искажениями, подавление которых при магнитном упорядочении может рассматриваться как возможная причина возникновения КМС.

В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований микроскопических неоднородностей в манганитах лантана.

В начале главы приведено теоретическое описание неоднородностей в манганитах с использованием техники функционала электронной плотности [6, 16]. Его результаты подтверждают, что локальные ян-теллеровские искажения элементарной ячейки при больших расстояниях между атомами могут не сохраняться. При малых расстояниях между атомами можно управлять свойствами манганитов. Утверждается, что это является решающим фактором для исследований микроскопических свойств манганитов.

Далее в этой главе изложены оригинальные экспериментальные результаты, полученные автором, по исследованию микроскопического расслоения в лантан-стронциевых манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125$  и  $0.175$ ) по изменению затухания и скоростей поперечных и продольных высокочастотных акустических волн.

Первая аномалия в затухании и скорости продольной волны в образце  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  наблюдалась при  $T = 305$  К. По температурному гистерезису она отнесена к структурному фазовому переходу первого рода, связанному с частичным переходом от ромбоэдрической к орторомбической фазе. Такое заключение основано на экспериментальном факте, что второе гистерезисное изменение параметров УЗ волны наблюдалось нами вблизи  $T = 210$  К, что свидетельствовало об окончательном переходе в орторомбическую структуру. Вторая аномалия вблизи  $T = 285$  К была вызвана магнитным фазовым переходом в ферромагнитную фазу, что подтверждается и магнитными измерениями.

При  $T \leq 300$  К наблюдалось значительное изменение амплитуды и скорости продольной моды. Приложение магнитного поля с  $H$  до  $10$  кЭ в этом температурном диапазоне приводит к еще более резкому уменьшению амплитуды и возрастанию скорости. Причем выше  $305$  К приложение магнитного поля не влияло на параметры продольной волны.

Одновременно при  $T = 305$  К, помимо импульса продольной волны, регистрировался новый УЗ импульс. Фазовая скорость его распространения, определенная по времени прохождения через образец, варьировалась в пределах  $V_t = (2.5 - 2.9) \cdot 10^5$  см/с, т.е. соответствовала скорости квазипоперечной моды, и зависела от температуры образца (рис. 14). Тогда амплитуда импульса возрастала до  $T = 270$  К, а далее сохранялась практически неизменной при понижении температуры. Характер возрастания амплитуды совпадал с температурным ростом намагниченности для данного образца.

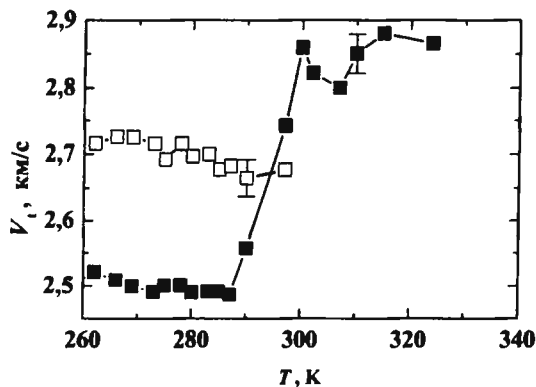


Рис. 14. Температурные зависимости скорости квазипоперечной моды ультразвуковых колебаний в образце  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ :  
 ■ — данные, полученные в нулевом магнитном поле;  
 □ — в поле  $H = 10$  кЭ.

Приложение магнитного поля приводило к росту амплитуды данной моды, то есть воздействие поля имело обратное влияние по отношению к продольной моде и также заканчивалось при  $T \leq 270$  К. Скорость квазипоперечной моды уменьшалась вблизи магнитного фазового перехода и возрастала в приложенном магнитном поле. По значению скорости, температурного и магнитного влияний на величину  $V$ , данная мода отнесена к магнитоупругой волне. Данный факт можно трактовать как трансформацию продольной акустической волны в квазипоперечную.

На основании этих результатов нами сделаны выводы о том, что для образцов с низкой плотностью легирования ( $x = 0.125$ ) наличие конкурирующего состояния между проводящей и непроводящей фазами индуцируют микроскопическое расслоение. А при более высоких степенях легирования ( $x \geq 0.175$ ) вблизи ферромагнитного перехода к переходу антиферромагнитному при низких температурах может иметь место микроскопическое разделение между этими фазами. Сделано предположение, что ферромагнитная и изоляторная фазы манганитов могут содержать нетривиальные скрытые порядки. Например, двухфазное состояние может быть связано с двухфазным структурным состоянием (ромбоэдрическим и орторомбическим) в широкой области температур.

Нами предложена модель, согласно которой обнаруженная модовая трансформация наиболее эффективно может возникать за счет смещения доменных границ магнитоупругих доменов или изменения их размеров (механизм магнитострикции). Усиление связанных магнитоупругих волн будет возникать в условиях размерных акустических резонансов, когда длина акустической волны кратна размеру образца ( $l$ ) или магнитоупругих неоднородностей. Вследствие индуцированной акустической нелинейности в образце с сильным магнитоупругим взаимодействием возникает спектр высших гармоник акустических колебаний на частотах:

$$f_n = V(2n + 1)/2l, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Хотя амплитуды гармоник убывают с ростом  $n$ , эффективные колебания можно ожидать для первых гармоник. Для частоты  $f = 7 \cdot 10^8$  Гц длина акустических волн укладывается в диапазон нескольких микрометров, то есть эффективное преобразование акустических волн в магнитоупругую волну в принципе может происходить на наноструктурах порядка сотен и тысяч ангстрем при распространении акустических волн с различной поляризацией вдоль различных направлений в кристалле. Если предположить, что в образце при определенных концентрационных и температурных условиях возникают микроскопические неоднородности, попадающие по размерам в спектр



магнитоакустических колебаний, то на выходе образца возможно распространение двух видов акустических волн, испытывающих трансформацию вследствие магнитоупругого взаимодействия. Следует отметить, что процесс генерации магнитоупругих колебаний возникает практически на всех магнитных неоднородностях, однако формирование когерентной моды происходит за счет высокой добротности образца при многократном отражении колебаний от плоскопараллельных торцов (принцип возникновения когерентности в акустическом резонаторе).

**Материал седьмой главы** диссертации посвящен исследованию эффекта невязанности при распространении ультразвуковых волн в образце  $\text{La}_{0,825}\text{Sr}_{0,175}\text{MnO}_3$ .

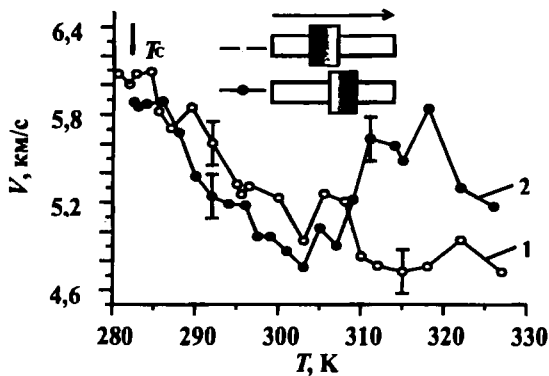


Рис. 15. Скорости распространения УЗ импульсов при прямой (1) и обратной (2) ориентациях образца  $\text{La}_{0,825}\text{Sr}_{0,175}\text{MnO}_3$ .

Основанием для исследования послужило обнаружение в этом образце микроскопических неоднородностей, которые могут повлиять на характер распространения ультразвука с длиной волны  $\lambda \leq 10$  мкм.

В температурном интервале 285–330 К автором обнаружено различие в скоростях ультразвуковых волн, распространяющихся в противоположных направлениях (эффект невязанности) (рис. 15).

Предположено, что наиболее вероятной причиной обнаруженной акустической невязанности является существование в данном температурном интервале структурных и магнитных многофазных состояний и образование структурных микроскопических неоднородностей. Размеры их по порядку величины сравнимы в нашем случае с длиной ультразвуковой волны. Поскольку на границах таких неоднородностей возникают упругие напряжения, то это обстоятельство может являться причиной локальных изменений параметров анизотропии.

Вследствие различия в углах падения и отражения на границах отдельных доменов может возникать асимметрия волновых векторов ультразвуковой волны, распространяющейся в прямом и обратном направлениях в образце.

Проведенный симметричный анализ показал, что обнаруженный эффект невязимности может быть связан с антиферромагнитным упорядочением в структурных фазах манганита, содержащих искажения орторомбической и ромбоэдрической симметрий [17].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и изготовлены акустические спектрометры на диапазоны частот 500–700 МГц и 700–1200 МГц, обладающие высокими выходной мощностью ( $\approx 5$  кВт) и чувствительностью приемного тракта ( $\approx 10^{-13}$ – $10^{-14}$  Вт), с развязкой приемного и передающего трактов  $\approx 100$  дБ. Спектрометры позволяют проводить измерения амплитуд и скоростей акустических импульсов в зависимости от величины и ориентации магнитного поля, направления акустической волны и температуры. Спектрометры могут найти широкое применение для исследования локальных изменений кристаллической решетки с  $\lambda \leq 10$  мкм и других магнитоакустических эффектов в новых материалах.

2. С помощью высокочастотной акустической спектроскопии обнаружены новые высокотемпературные структурные переходы в лантан-стронциевых манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125, 0.15, 0.175$ . Установлено, что они относятся к фазовым переходам первого рода и связаны с перестройкой пространственной структуры искаженных октаэдров  $\text{MnO}_6$  за счет проявления эффекта Яна – Теллера, связанного с ионами  $\text{Mn}^{3+}$ .

3. Исследован процесс микроскопического расслоения в манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125$  и  $0.175$  по изменению сдвиговых и продольных модулей упругости ВЧ ультразвуковых волн с длиной волны  $\lambda \leq 10$  мкм. Установлено, что для образцов манганитов с низкой плотностью легирования ( $x = 0.125$ ) наличие конкурирующих состояний между проводящей и непроводящей фазами индуцирует микроструктуру. При высоких степенях легирования ( $x = 0.175$ ) вблизи ферромагнитного перехода к антиферромагнитному переходу возникает микроскопическое разделение между фазами, которое может быть связано с двухфазным структурным состоянием (ромбоэдрическим и орторомбическим) в широкой области температур.

4. Доказано существование областей ближнего и дальнего порядков ян-теллеровски искаженных октаэдров  $\text{MnO}_6$  и их влияние на упругие, магнитные и транспортные характеристики слабелегированных лантан-стронциевых манганитов.

5. Обнаружена модовая трансформация продольной акустической волны в квазипоперечную волну в образце манганита  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$ . По значению и изменению скорости от температуры и магнитного поля данная мода была отнесена к магнитоупругой волне. Эти экспериментальные результаты

подтверждают предположение, что нелинейные магнитоупругие свойства доменной структуры манганитов проявляются в частотной и модовой трансформациях распространяющихся через них высокочастотных акустических волн.

6. Показано, что одной из основных причин возникновения эффекта колоссального магнитосопротивления является подавление приложенным магнитным полем ближнего порядка в расположении деформированных октаэдров  $\text{MnO}_6$  в лантан-стронциевых манганитах.

7. В монокристаллах  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  обнаружено различие в скоростях ультразвуковых волн, распространяющихся в образце в противоположных направлениях (эффект невязимости). Наиболее вероятной причиной акустической невязимости является существование в определенном температурном интервале структурных и многофазных состояний и образование структурных микроскопических неоднородностей.

8. Обнаружено и исследовано явление расщепления сигнала ЯМР ядер  $^{57}\text{Fe}$  в многодоменных образцах слабого ферромагнетика  $\text{FeVO}_3$  на несколько пиков поглощения. Показано, что данный эффект обусловлен наличием слоистой доменной структуры  $\text{FeVO}_3$  и особенностями динамики монодоменизации этого кристалла. Экспериментально установлена зависимость расщепления сигналов ЯМР от интенсивности переменного поля. Результаты проведенных исследований позволили установить динамику монодоменизации кристаллов  $\text{FeVO}_3$ .

9. Обнаружено и изучено явление аномальной дисперсии скорости поперечного ультразвука в монодоменных образцах  $\text{FeVO}_3$ , заключающееся в скачкообразном изменении скорости с изменением знака дисперсии в условиях точного акустического ЯМР. Показано, что это явление связано с образованием двух ветвей связанных магнитоупругих волн вследствие расталкивания вблизи точки пересечения дисперсионных кривых колебаний ядерной намагниченности и звука, распространяющихся в образце с разными скоростями. Наблюдаемое изменение скорости объясняется тем, что в точке пересечения дисперсионных кривых происходит переход с одной ветви связанных магнитоупругих волн на другую. Данный эффект может рассматриваться как новый способ регистрации ядерного магнитоакустического резонанса.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, входящие в перечень ВАК

1. Булатов А.Р. Дисперсия скорости звука в борате железа при ядерном магнитоакустическом резонансе / Богданова Х.Г., Леонтьев В.Е., Шакирзянов М.М., Булатов А.Р. // СПб.: ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 3. С. 492 – 498.
2. Булатов А.Р. Особенности распространения высокочастотного ультразвука в области структурных и магнитных фазовых переходов в манганите  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Шакирзянов М.М. // СПб.: ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 8. С. 1512 – 1515.
3. Булатов А.Р. ЯМР и динамика монодоменизации антиферромагнетика  $\text{FeVO}_3$  в постоянном магнитном поле / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Леонтьев В.Е., Шакирзянов М.М. // М.: ФММ. 2001. Т.91. № 5. С. 28 – 35.
4. Bulatov A.R. Propagation of ultrasound waves in the vicinity of phase transitions in manganite perovskites / Bogdanova Kh.G., Bulatov A.R., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kapralov A.V., Shakirzyanov M.M. // M.: The Physics of Metal and Metallography. 2001. V. 91, Suppl. 1. P. S212–S213.
5. Булатов А.Р. Акустические аномалии вблизи фазовых переходов в манганите / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Капралов А.В. // М.: Акустический журнал. 2002. Т. 48. № 5. С. 596–601.
6. Булатов А.Р. Особенности акустических и магнитных свойств манганитов лантана состава  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Елохина Л.В., Капралов А.В., Королев А.В., Нейфельд Э.А., Шакирзянов М.М. // СПб.: ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 2. С. 284 – 289.
7. Булатов А.Р. Особенности температурной зависимости магнитной восприимчивости монокристалла  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  // Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Королев А.В., Куркин М.И., Розенфельд Е.В. // М.: ФММ. 2003. Т.95. № 1. С. 43 – 46.
8. Булатов А.Р. Микроскопические неоднородности в кристалле манганита  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) и генерация на них когерентных магнитоупругих колебаний / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Капралов А.В., Потапов А.В. // М.: Письма в ЖЭТФ. 2003. Т.78. Вып. 5. С.753 – 756.
9. Булатов А.Р. Взаимосвязь магнитных и структурных фаз в монокристалле манганита  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Капралов А.В., Леонтьев В.Е., Потапов А. А. // М.: Письма в ЖЭТФ. 2004. Т.80. Вып.5. С. 354–357.

10. Булатов А.Р. Эффект невязимности при распространении ультразвука в монокристалле  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Капралов А.В., Куркин М.И., Потапов А.В., Николаев В.В. // СПб.: ФТТ. 2006. Т. 48. Вып.2. С. 309–311.

11. Булатов А.Р. Высокочастотные ультразвуковые исследования структурного фазового перехода в монокристалле  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Мамин Р.Ф., Потапов А.А. // СПб.: ФТТ. 2007. Т.49. Вып.3. С. 496–498.

12. Булатов А.Р. Особенности распространения акустических волн вблизи структурного фазового перехода в манганите  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А. // М.: Известия РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. №8. С. 1193–1195.

13. Булатов А.Р. Влияние ян-теллеровских деформаций на структурно- и магнитоупорядоченные состояния в перовскитоподобных оксидах переходных металлов / Богданова Х. Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И., Потапов А.В. // М.: Известия РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. №8. С. 1225–1227.

14. Булатов А.Р. Трансформация акустической моды вблизи структурного и магнитного фазовых переходов в кристалле  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А., Усачев А.Е. // М.: Известия РАН, Сер. физ. 2009. Т. 73. №8. С. 1080–1082.

15. Булатов А.Р. Решеточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ) / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Елохина Л.В., Королев А.В., Нейфельд Э.А. // СПб.: ФТТ. 2010. Т. 52. №11. С. 2238–2243.

16. Bulatov A.R. Structural, Magnetic and Electrical Properties of the Slightly Doped Lanthanum Manganites // Bogdanova Kh.G., Golenishev-Kutuzov V.A., Elokhina L.V., Neifeld E.A. and Korolev A.V. // Solid State Phenomena. 2011. V.168–169. P. 481–484.

#### Работы, опубликованные в трудах международных конференций и симпозиумов

17. Булатов А.Р. Модовая трансформация высокочастотных ультразвуковых колебаний в манганите  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) / Булатов А.Р., Капралов А.В. // VII Российская научная школа «Новые аспекты применения магнитного резонанса»: Труды конференции. Казань, 2003. С. 54 – 58.

18. Булатов А.Р. Особенности акустических, магнитных и электрических свойств манганита лантана  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) в магнитоупорядоченной фазе / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Капралов А.В., Потапов

А.А. // XXXIII совещания по физике низких температур: Труды конференции. Екатеринбург, 2003. С. 130 – 131.

19. *Bulatov A.R.* Studied of thr elastic properties of manganite  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Bogdanova Kh.G., Bulatov A.R., Golenishev-Kutuzov V.A., Kapralov A.V., Potapov A.A. // XIX международная школа «Новые магнитные материалы микроэлектроники»: Сборник трудов. Москва, 2004. С.213 – 214.

20. *Булатов А.Р.* Роль ян-теллеровских ионов в формировании кластерных и доменных структур в перовскитоподобных оксидах / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И., Капралов А.В., Потапов А.А. // X международная конференция «Физика диэлектриков»: Материалы докладов. Санкт-Петербург, 2004. С.322.

21. *Bulatov A.R.* Non-reciprocity effects at ultrasound propagation to a single-crystal  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Potapov A.A., Bulatov A.R., Bogdanova Kh.G., Golenishev-Kutuzov V.A., Leont'ev V.E. // Moscow International Symposium on Magnetism. Moscow. 2005. Pp. 379 – 380.

22. *Булатов А.Р.* Взаимосвязь магнитных и структурных фаз в монокристалле манганита  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) / Булатов А.Р., Потапов А.А. // XI Международная научно – техническая конференция «Радиоэлектроника, электроника и энергетика»: Сборник докладов. Москва, 2005. С. 276 – 277.

23. *Булатов А.Р.* Эффект невязимности акустических волн в манганите / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Калимуллин Р.И., Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев – Кутузов А.В., Потапов А.А. // Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела»: Сборник докладов. Минск, 2005. Т.1. С. 88 – 89.

24. *Булатов А.Р.* Особенности распространения акустических волн вблизи структурного фазового перехода в манганите  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А. // 9-й международный симпозиум «Упорядочение в металлах и сплавах»: Труды конференции. Ростов-на-Дону, 2006. Т.2. С. 98 – 101.

25. *Булатов А.Р.* Влияние двухфазности кристаллической структуры на упругие свойства манганита лантана / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А. // 34 совещание по физике низких температур «НТ–34»: Труды конференции. Ростов-на-Дону, 2006. Т.1. С. 126 – 127.

26. *Булатов А.Р.* Высокочастотные ультразвуковые исследования структурного фазового перехода в монокристалле  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$  / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Потапов А.А. // Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела. ФТТ – 2007»: Сборник докладов. Минск, 2007. Т.1. С. 258 – 261.

27. *Bulatov A.R.* The study of the correlation of elastic – acoustic, electrical and magnetic properties in weakly doped Lanthanum-Strontium Manganites / Bogdanova

Kh.G., Bulatov A.R. // 10-th International meeting „Ordering in Minerals and Alloys”, (OMA-10): Proceedings of the International meeting. Rostov-on-Don, 2007. Vol. 1. P. 18.

28. *Bulatov A.R.* Transport, ultrasound and structural properties for manganites  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125$ ) / Bogdanova Kh.G., Bulatov A.R. // 3rd International conference «Physics of Electronic Materials»: Proceedings of conference. Kaluga, 2008. V. 2. Pp. 63 – 65.

29. *Bulatov A.R.* Lattice, electrical and magnetic effects in lanthanum manganites  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ) / Bogdanova Kh.G., Bulatov A.R., Golenishchev-Kutuzov V.A., Elokhina L.V., Neifeld E.A., Korolev A.V. // IV Euro – Asian Symposium «Trends in MAGnetism» Nanospintronics (EASTMAG – 2010). Ekaterinburg, 2010. P. 371.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Туров Е.А., Шавров В.Г. Нарушенная симметрия и магнитоакустические эффекты в ферро и антиферромагнетиках // УФН. 1983. Т.140. № 7. С.429 – 462.

2. Кугель К.И., Хомский Д.И. Эффект Яна-Теллера и магнетизм: соединения переходных металлов // УФН. 1982. Т.136. Вып. 4. С. 621– 664.

3. Нараев Э.Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением // УФН. 1996. Т.166. № 8. С. 833 – 858.

4. Urushibara A., Morimoto Y., Arima T., Asamitsu A., Kido G., Tokura Y. Insulator – Metal Transition and Giant Magnetoresistance in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. № 20. P. 14103 – 14109.

5. Dagotta E. Nanoscale Phase Separation and Colossal Magnetoresistance. Berlin: Springer, 2002. 456 p.

6. Лекомцев С.А., Михалев К.Н., Якубовский А.Ю., Кауль А.Р. Особенности низкочастотной спиновой динамики в манганите  $\text{LaMnO}_3$  по данным ЯМР  $^{139}\text{La}$  // ЖЭТФ. 2006. Т.129. С.761–767.

7. Darling T.W. Measurement of the elastic tensor of a single crystal of  $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$  and its response to magnetic fields // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. № 9. P. 5093 – 5097.

8. Zainullina R.I., Bebenin N.G. Longitudinal sound velocity and internal friction in ferromagnetic  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  single-crystal manganites // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. P. 064421– 064425.

9. Овчинников С.Г., Заблуда В.Н. Энергетическая структура и оптические спектры  $\text{FeVO}_3$  с учетом сильных электронных корреляций // ЖЭТФ. 2004. Т.125. В.1. С.150 – 159.

10. Geck J., Wochner P., Bruns D., Buchner B., Gebhardt H., Kiele S., Reutler P., and Revcolevschi A. Rearrangement of the orbital – ordered state at the metal – insulator transition of  $\text{La}_{7/8}\text{Sr}_{1/8}\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. B. 2004. Vol.69. № 10. P.104413 – 104422.
11. Marysko M., Savosta M.M., Jirak Z., Novak P. Anomalous temperature dependence of the magnetization in  $\text{La}_{0.84}\text{Sr}_{0.16}\text{MnO}_3$  // Applied Physics. 2009. Vol. 105. № 7. P. (07D716 – 1) – (07D716 – 3).
12. Mayr F., Hartinger Ch., Loidl A. Structural aspects of the phonon spectra of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. B. 2005. Vol.72. №2. P.024425 – 024432.
13. Hazama H., Goto T., Nemoto Y., Tomioka Y., Asamitsu A., Tokura Y. Quadrupolar effect in the perovskite manganite  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  // Phys. Rev.B. 2000. Vol. 62. №22. P.15012–15020.
14. Uhlenbruck S., Teipen R., Klingeler R., Buchner B., Friedt O., Hucker M., Kierspel H., Niemoller T., Pinsard L., Revcolevschi, and Gross R. Interplay between Charge Order Magnetism, and Structure in  $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol.82. № 1. P.185–188.
15. Klingeler R., Geck J., Arumugam S., Tristan N., Reutler P., Buchner B., Pinsard – Gaudart L., Revcolevschi A. Pressure – induced melting of the orbital polaron lattice in  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73. P. (214432 – 1) – (214432 – 5).
16. Rozenberg E., Ausiender M., Shames A.I., Gorodetsky G., Mukovskii Ya. M. Inherent inhomogeneity in the crystals of low – doped lanthanum manganites // Applied Physics. 2008.Vol.92. № 22. P. (222506 – 1) – (222506 – 3).
17. Туров Е.А., Колчанов А.В., Меньшенин В.В., Мирсаев И.Ф., Николаев В.В. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков М.: Физматлит, 2001. 560 с.

Подписано к печати 6.05.11

Гарнитура “Times”

Физ. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз.

Вид печати РОМ

Усл.-печ. л. 1,88

Формат 60×84/16

Бумага “Business”

Уч.-изд. л. 2,0

---

Отпечатано в ООО «Центр Оперативной Печати», ИНН 1660043034  
420107, г. Казань, ул. Х. Такташа, 105, тел.: (843) 277-95-50, заказ № 125844